

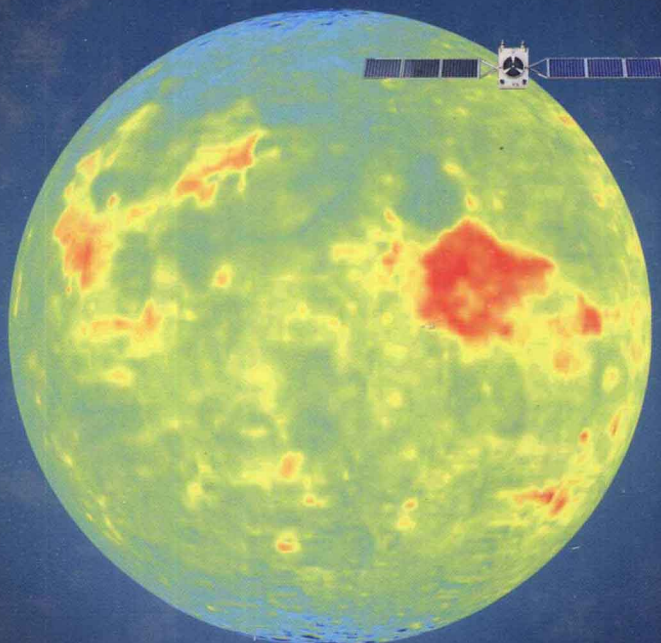
中国微波探月研究

**Selected Papers on Microwave Lunar
Exploration in Chinese Chang' E-1 Project**

姜景山 金亚秋 主编

MICM

THE MICROWAVE MOON



科学出版社

中国微波探月研究

Selected Papers on Microwave Lunar
Exploration in Chinese Chang'E-1 Project

姜景山 金亚秋 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

月球的微波亮温反映了月球表面的物理特性、内部过程和月球外部各种因素对月球的影响,以及月球和其周围环境之间的关系与能量交换。全面地进行微波探月是“嫦娥探月”的重要使命之一。中国科学院空间科学与应用研究中心研究团队在“嫦娥一号”(CE-1)卫星上成功实施了全月微波探测,并根据 CE-1 微波探测仪探测数据,在国际上首次获得了一些创新结果,构建了“微波月亮”,这使得人类对月球的认识有可能更接近其自然真实。

本文集收录的文章包括微波探月的理论与方法、硬件设计与定标,“嫦娥一号”微波探测仪数据处理和分析等方面的论文及重要的实验数据,兼顾了少部分有关主动微波探测方面的文章。

本文集将为未来的探月及从事探月研究的相关科研人员提供新的信息与思维。

图书在版编目(CIP)数据

中国微波探月研究 / 姜景山,金亚秋主编. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030261-8

I. ①中… II. ①姜…②金… III. ①微波技术-应用-月球探索-研究-中国 IV. ①V1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021893 号

责任编辑:彭胜潮 / 责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 2 月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2011 年 2 月第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 1—800 字数: 915 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

靓嫦娥和微波月亮

(代序)

从1957年苏联发射第一颗人造卫星和1961年苏联宇航员进入太空以后的50年来,航天技术突飞猛进,新成就和新记录层出不穷,牵动了社会各界和科学家、工程师们的心,对各学科的研究方向产生了巨大影响。

人类自古仰视天空,月球的阴晴圆缺总与人间的爱恨恩怨相系。怀古时叹“今人不见古时月,今月曾照古时人”(李白)。离别苦曰“秦时明月汉时关”(王昌龄)、“别时容易见时难”(李煜)。良宵称为“月白清风”;媒人叫“月老”;评品人物叫“月旦”。形势险恶,也拿月亮开涮:“月黑杀人夜,风高放火天”(元·鞭然子)。万有引力被发现前,辛弃疾百思不解者“飞镜无根谁系?嫦娥不嫁谁留?”

关于月球的起源,主要有捕获说、共振潮汐分裂说、双星说和大碰撞分裂说,至今仍众说纷纭,还要继续探讨。

月亮总是一面对着地球,人类从未见过背面;50年前曾有人疑思:月背有否外星人的秘密营地?进入航天时代以后,月球当然是第一个探测目标。

1958年8月17日,苏联发射了“月球1958A”探月卫星,发射后92秒失败。1959年1月2日苏联发射了“月球一号”探月卫星,离月面5995km处掠过而飞丢。1959年9月12日“月球二号”带国徽直撞月球,先占为快。1965年10月14日,苏联发射的“探测器-3号”卫星首次传回了人类从未见过的月球背面照片。苏联国家测绘总局和苏联科学院立即制作了月背面1:500万月貌图,命名了较大型的地形单元,以大批苏联科学家和城市的名字命名,如“莫斯科海”、“加加林高地”、“科洛略夫盆地”、“门德列夫平原”和

“科瓦列夫斯卡娅撞击坑”等,很快得到了国际天文学联合会的批准,成为国际标准命名。这是无可争议的发现权和原始性创新。1958~1976年间苏联发射了61颗月球探测器,实现了飞船登月、返回,共取回月岩样品300余克。

冷战时期,苏、美互不相让。美国自1958年8月17日发射“先驱0号”月球轨道器以来,1958年10月20日发射“先驱一号”(Pioneer-1)飞丢后,先后发射了“先驱者”、“徘徊者”系列卫星,但大多失败了。1961年肯尼迪总统下决心送人登月。8年后,“阿波罗八号”(Apollo-8)首次载人绕月,安全返回。1969年7月16日,“阿波罗-11号”(Apollo-11)载三人飞月,二人登月(N. Armstrong, E. Aldrin),月面探行21小时36分钟,带回月岩28 kg;一人留月轨接迎返回(M. Collins)。“阿波罗-11号”写下了人类登月的历史记录。到1972年底,美国宇航员登月6次,有12人登上月球,累计在月球上工作了600人·小时,共取回月岩样品381 kg。

日本于20世纪末制定了雄心勃勃的探月计划,于1990年1月24日发射的“飞天号”(Hiten-24)重182 kg,放出“羽衣号”绕月小卫星(重11 kg),开始探月。2007年9月14日发射“辉夜姬号”(Kaguya),重2.885t,装13种仪器,轨高100 km,成功探测月面。

欧洲航天局于2003年开始探月活动。印度空间组织(ISRO)于2008年发射了“月船一号”探测月球。

联合国大会早于1979年12月5日通过

一个国际《月球协定》，规定对月球实行公有制。月球及其一切资源属全人类所有，各国可自由探测，鼓励国际合作，禁止军事用途。到2000年已有14个国家签字，美、俄、中国等尚未签署。中国于20世纪90年代初启动了载人航天计划（“921工程”）。2003年2月宣布启动探月工程。2004年2月国务院批准执行，命名“嫦娥一号”。2007年10月24日“嫦娥一号”发射成功，同年11月5日进入绕月轨道，轨高200km，星重2350 kg，星上8种仪器，有效载荷140kg；11月20日开始大批量传回数据，11月26日地面已得到了二维和部分三维月面图像。“嫦娥一号”在轨正常工作了1年又5个多月，于2009年3月1日受控撞月。“嫦娥一号”是后来者，比美、苏晚了37年。但是，无疵运载、准确轨控、姿控稳妥、全月观测（月纬 $\pm 90^\circ$ ）、海量通信（39GB/d）、可靠运行（1年又5个多月）、精密遥感等，仍使国际航天界惊叹不已。与1958~1962年间苏、美首批十多个探月卫星全部飞丢或撞毁相比，中国的“嫦娥”显得稳健和潇洒得多。青果胜蓝。

50年来，各国用各种方式对月球进行了探测。用绕月卫星或从地球上对月球进行可见光观测，建立了“可见月球”（Visible Moon）的月貌地形图，探测到“红外月球”（Infrared Moon）详图等。但在“嫦娥一号”卫星之前，还没有从绕月轨道上对全月面进行过微波探测。通过“嫦娥一号”的探测，增加了我们对月球微波特征的知识，如月表微

波亮温分布、反演月壤厚度及估算稀有气体氦-3的资源量。

月球已存在46亿年，是地球的同庚，它没有大气层，是一个完全“暴露”在太空的天体。40多亿年来岩浆作用、火山活动和内部的结构发生过重要变化。由于不断受到太阳系小天体的撞击、宇宙射线和太阳风等的袭击，月面上留下了很多历史痕迹。这些内外变化在微波亮温特征中也有轮廓性反映。中国科学院空间科学与应用研究中心姜景山院士创议的从月球轨道上对月面进行微波探测已在“嫦娥一号”上顺利实现。他领导的团队用自己研制的微波辐射计（CELMS）在4个频段上（S、C、K、Ka，即3.0GHz、7.8GHz、19.35GHz、37GHz）成功实现了全月面的微波探测，获得了一些新数据，初步构建了“微波月亮”（The Microwave Moon，简称MicM）图像，这为我们认识月球开辟了新的讯源。

姜景山和金亚秋主编的《中国微波探月研究》，包括了微波探月的科学理论和方法、仪器设计、数据处理和分析等方面，这些都将成为以后月球探测的宝贵经验和财富。

从该文集内容读者可看出，“微波月亮”计划的实现也是国内外科学界合作的成就。中国科学院空间科学与应用研究中心、复旦大学、美国得克萨斯大学等单位的数十位科学家花费6年多时间，终于开展了这项开拓性工作。我向他们表示祝贺。

宋健

2010年7月12日

前言

浩瀚的太空,无穷尽的空间,人类生活在其中的地球上。地球有一颗长久相伴的天然卫星——月球。自古以来,人类对太空始终存在着深深的思考与向往。其中,月球是人类有文明史以来,特别是近代以期征服的天体。自20世纪50年代人类进入太空、开辟太空时代以来,已经多次用人造飞行器对月球进行探测,特别是20世纪60年代以后的十多年间,以美、苏为代表的国家斥巨资进行了月球探测。1969年美国“月球人”阿姆斯特朗第一次踏上月球,开辟了人类就地探月的先河。自此,人类对月球的认识有了很大程度的深化。

尽管人类以多种方式对月球进行了探测和研究,但这只是很小一部分。我们对月球的了解还相差甚远,诸多问题仍待长期深入研究。至今,特别是有了太空技术以来,已经发送探测器就近对月球进行探测研究,或从地球上对月球进行观测。这些手段主要是采用可见光或红外技术,已建立了“可见月球”(Visible Moon)、“红外月球”(Infrared Moon),但在“嫦娥一号”卫星微波探测仪(CE-1 Lunar Microwave Sounder——CELMS)绕月探测之前,从来没有从月球轨道对全月球进行微波探测的活动。很多涉及月球微波特征的研究,如月表微波亮度温度(简称“微波亮温”, T_{BL})的分布、月壤厚度及氦-3资源量分布信息、涉及月球历史等的研究,多数是靠美国的Apollo、苏联的Luna探测器的落月点实测数据为依据,加上其他探测方法(如光学等)的结果进行融合分析并逻辑延伸而得来的,因此其结果存在相当的多解或不确定性。这就使我们对月球微波辐射特性的真实情况了解很少,甚至可能是有偏差的。这对月球探测和应用研究而言不能不说是一个巨大的缺失。

月球的微波亮温反映了月球表面的物理特性、内部过程和月球外部各种因素对月球的影响及月球和其周围环境之间的关系与能量交换。月球是一个完全“暴露”在太空的小型天体,几十亿年来其内部的能量、结构等都发生了重要变化,其地质时钟几乎停留在几十亿年前,而且在几十亿年间不

断受到宇宙物质流、太阳风等来自外部的各种影响,这些“外来客”在月球上也留下了很多痕迹,这些内、外作用与变化很多都可以在微波亮温异常中反映出来。微波全月面探测将为月球科学、太阳系科学、地球科学的研究提供至今所没有的全新信息。因此,全面地进行微波探月十分重要,这也是“嫦娥探月”的重要使命之一,具有深远的科学意义。为此,中国科学院空间科学与应用研究中心(以下简称“中科院空间中心”)姜景山院士提出从月球轨道进行微波探月计划,并领导研究团队在“嫦娥一号”(CE-1)卫星上成功实施了全月微波探测;并根据CE-1微波探测仪探测数据,在国际上首次获得了一些创新结果,构建了“微波月亮”(The Microwave Moon, MicM),这使得人类对月球的认识有可能更接近其自然真实。

“嫦娥一号”探月卫星自2007年10月24日成功发射并于同年11月7日进入其工作轨道以来,至2008年3月1日成功地受控落月,在轨工作一年多时间,完成了全部使命,期间获取了大量的科学数据。其中,“嫦娥一号”月球微波探测仪已多次覆盖全月表面,在世界上首次获取了全月微波亮温分布数据。“微波月亮”的建立为月球科学研究、宇宙科学研究、月球资源研究及应用、未来月球基地的建立等带来了全新的信息,与“可见月亮”、“红外月亮”及其他相关探测结果(如X光谱仪、中子谱仪)、地基探测及未来月球轨道上观测和就位探测等多方信息的融合、分析,将大大提升人类对太空、月球及宇宙起源、生命起源等问题的认识和研究水平,在人类探月活动中具有里程碑意义。

“微波月亮”是中国“嫦娥一号”卫星从绕月轨道上用微波探测仪对全月覆盖而获取的全月微波亮温图后展示的一种新的月球视角。CELMS所获取的“全月微波亮温图”在世界属首次,即MicM的提出属首次。MicM将展示在不同频率、不同时段的全月亮温分布图,并关注特殊区域如月球两极及月球背面(Far Side)的亮温状况。

“嫦娥一号”微波探测仪的微波探月因为以前

没有人做过,有难度,为做好这项工作,从方法的提出、立项到在轨探测的全过程,中科院空间中心国家 863 计划微波遥感实验室相关科技人员从理论研究到技术实现的各个方面,均以严格的科学态度,认真对待每一步,使这一项创新思想取得圆满结果。从项目提出开始就分两个方面同时工作:一方面研制符合要求、适应绕月轨道各种环境条件的探测仪器;另一方面组织国内外相关研究机构进行了有关月球微波特征、信息反演方法等研究。参加合作研究的单位有:复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室、美国得克萨斯大学波散射研究中心(University of Texas at Arlington, U. S. A.)、中科院空间中心国家 863 计划微波遥感实验室。国际著名的波散射与微波遥感专家金亚秋教授、A. K. Fung 教授以及中科院空间中心专家姜景山、王振占、张德海、张晓辉、刘和光、吴季等教授指导或直接参加了 CE-1 号微波探测仪数据处理和分析

工作。这一过程历时近 6 年,编写了硬件研制技术文档上百篇,理论分析和方法研究论文及各种调研报告数十篇,参阅了百篇以上国外相关资料,组织了国内外相关专家、学者数十人,以期我们的研究基于牢固的软硬件及理论研究基础之上,确保探测结果的质量和真实性。

本文集收录的文章包括:微波探月的理论与方法、硬件设计与定标、“嫦娥一号”微波探测仪数据处理和分析等方面论文及重要的实验数据,以 CELMS 及其探测数据为主,兼顾了少部分有关主动微波探测方面的文章。为避免重新排版引起差错,故部分文章仍采用原来刊物的版面。本文集的出版将为未来的探月及从事探月研究的相关同行、学生提供新的信息与思维。撰写本文集论文所使用的“嫦娥一号”微波探测仪数据可以从中国科学院科学数据库空间科学数据网格(<http://www.space.csdb.cn>)免费下载。

本书编委会

2010 年 7 月

Preface

Human is yearning for reaching moon since ancient times, yet it was just a dream at that era for the lacking in space technologies. With the first man-made satellite Sputnik launched successfully on Oct. 4th, 1957, human has been entered into space and opened a space era. Up to now, several thousands artificial spacecrafts have been launched and human has realized the manned space projects and space explorations, especially in the period between 1960th and 1970th when U. S. A. and former Soviet Union promoted the moon exploration programs actively. Representatives in the promotion are Apollo Project of U. S. A. and Luna Project of USSR. As a brilliant fruit, a U. S. astronaut Armstrong landed on the lunar surface and left the first human footprint on the moon, which opened a new era of deep space exploration.

Although moon exploration activities performed quite active in the past several ten years and lunar science has been advancing rapidly, human still quite lacked knowledge in moon sciences. Understanding moon becomes more crucial for future exploration of the solar system and for the earth-moon system's history.

For a long time, visible light and infrared have been the preferred wavelengths for lunar observations. But visible and near infrared light cannot "see" the dark side of the Moon, while microwave observation has "capability" to "see" things in the dark without solar illumination, moreover, it can penetrate a certain depth under the surface of dielectric material. Therefore, these characteristics demonstrates microwave as a more effective approach for all-time moon observation. Studies on lunar microwave features have high scientific values in obtaining information in thermal conditions (especially in the polar and far side regions, where

data are scarce), and in the depth and structures (e. g. , roughness) of the lunar soil. Therefore, observation of the lunar microwave features has become an important issue.

China first lunar probe satellite "Chang'E-1" (CE-1) was successfully launched on Oct. 24th, 2007 and reached the lunar polar working orbit at 200 km altitude above lunar surface on Nov. 7th 2007. CE-1 satellite had been working normally during the life time more than one year and achieved huge scientific data and images. Chang'E-1 Lunar Microwave Sounder (CELMS) is the first of the scientific payloads onboard the satellite which covered moon globe surface several times and got the moon globe microwave brightness temperature (T_{BL}).

Until CELMS had flown around lunar orbit, there have no global microwave information and the microwave data concerning the moon global surface microwave brightness distribution, global regolith layer thickness, helium-3 deposit and information concerned with lunar history, which was only analyzed by the local in-situ data of Apollo Luna landing sites, with many uncertainties.

To improve the situation, the science group heading by Prof. Jiang Jingshan who is a sponsor of CELMS project from Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences (CSSAR, CAS) proposed the microwave sounding project to implement on CE-1 project. With the data collected, they established the Microwave Moon (MicM) world firstly, which greatly promotes the knowledge of moon. MicM values importantly for lunar science and cosmic science, resources and applications. The fusion of MicM data with other results measured by X, γ -ray spectrometers data and earth-based measurements data

provides us a new way to comprehend moon, we can significantly improve the level of human knowledge on origin of space and lives. Since the results make the moon more close to its nature truth, it is a new milestone in lunar exploration.

MicM is the initiative results of CELMS and gives the lunar global microwave brightness temperature map (T_{BL}), including different veins of moon global surface T_{BL} , polar microwave anomalies, some hot points of T_{BL} . Through analyzing the MicM, not only can we provide some new answers and correct some formal hypothesis of lunar science (some initiative results differ from the earlier works performed by other lunar scientists), but also rises to new questions, such as thermal history of lunar surface region; lunar radiation environment, lunar polar subsurface temperature history, global microwave anisotropy probe; moon disc microwave brightness temperature performing as signals of phase, regions and times; the depth distinction of the moon regolith layer and dielectric constant map and so on. In data fusion we took special attentions for lunar far-side and reached some new conclusions which have great importance for lunar sciences.

From the discussion above, it is clear that microwave sounding of the moon has unique values not only for lunar science research, but also for planetary sciences.

To promote microwave lunar sounding more successfully and accurately, CELMS team organized two groups, one is for the hardware system design to meet the special operating environment and conditions of lunar orbit. The second group is working on data fusion, such as the theoretical

modeling, data processing methods and related lunar features and results obtained by world-wide scientists during more than 40 years moon exploration. The science and data fusion group involves specialists from different countries including: Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Fudan University; Center for Wave Scattering Research, University of Texas at Arlington, U. S. A. ; National Microwave Remote Sensing Laboratory, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences (CSSAR, CAS). Several world-wide famous scientists such as Prof. Jin Yaqiu from Fudan University, Prof. A. K. Fung from University of Texas at Arlington, U. S. A. , Prof. Jiang Jingshan and other scientists from CSSAR, CAS and Prof. Wang Zhenzhan, Prof. Zhang Dehai, Prof. Zhang Xiaohui, Prof. Liu Huguang, Prof. Wu Ji are also involve in this project. During the past 6 years, many published plenty of research papers and technical documents have been published, and presented deep theoretical base to ensure the data's trueness and results' validity.

This selected paper collection involves papers on the theory and methods of microwave lunar exploration, the hardware design and calibration, the analysis of CELMS data fusion results and other concerned papers.

We hope this selected paper collection be useful for lunar science development, and benefit the future lunar science research for more new ideas and information. And the CELMS dataset which these papers based on could be downloaded from the Chinese Visual Space Science Observatory website (<http://www.space.csdb.cn/english/>) freely.

The Editorial Committee

July, 2010

目 录

Contents

靓嫦娥和微波月亮(代序)

前言

Preface

第一部分 微波月亮——人类对月球的全新视角

Microwave Moon——A New View of the Moon

中国首次月球探测工程科学探测系统及信息的初步分析	姜景山 孙辉先(3)
微波月亮:人类对月球的全新视角——中国“嫦娥一号”卫星微波探测仪若干探测结果	姜景山 等(33)
New Views of Lunar Microwave Feature——Some Results of CE-1 Microwave Sounder(CELMS)	Jiang Jingshan et al. (47)
The Microwave Moon——Microwave Sounding the Lunar Surface from China Lunar Orbiter CE-1 Satellite	Jiang Jingshan et al. (57)

第二部分 嫦娥绕月卫星微波探测仪系统设计、研制、地面实验及定标

The Design, Ground Experiments and System Calibration of Chang'E Lunar Microwave Sounder

中国首次月球探测卫星载荷微波探测仪	张晓辉 姜景山 等(75)
“嫦娥一号”微波探测仪探测月壤厚度机理和地面验证实验	张德海 等(86)
空间微波环境对“嫦娥一号”微波探测仪在轨定标影响分析	崔海英 等(94)
月表粗糙度对月壤亮度温度影响的研究	时 莉 张晓辉(101)
The Analysis of Affections to the Cold Space Calibration Source of Chang'E-1 Payload Microwave Detector	Zhang Huiya et al. (106)
Prelaunch Calibration of Chang'E-2 Lunar Microwave Radiometer	Wang Zhenzhan et al. (114)

第三部分 全月微波特征提取:月表面微波辐射理论建模及算法研究

Modeling and Simulation for Microwave Emission

“嫦娥一号”卫星微波探月技术机理和应用研究	姜景山 等(121)
“嫦娥一号”卫星微波探测仪数据处理模型和月表微波亮温反演方法	王振占 等(128)
月表温度剖面对于“嫦娥一号”卫星微波探测仪探测亮温影响的模拟研究 ...	李 芸 王振占 姜景山(144)
Simulation of Brightness Temperature from Lunar Surface and Inversion of the Regolith-Layer Thickness	Fa Wenzhe Jin Yaqiu(158)
An Inversion Approach for Lunar Regolith Layer Thickness Using Optical Albedo Data and Microwave Emission Simulation	Jin Yaqiu Fa Wenzhe(171)

The Modeling Analysis of Microwave Emission from Stratified Media of Non-uniform Lunar Cratered Terrain Surface for Chinese Chang'E-1 Observation	Jin Yaqiu(186)
Quantitative Estimation of Helium-3 Spatial Distribution in the Lunar Regolith Layer	Fa Wenzhe, Jin Yaqiu(191)
A Microwave Radiative Transfer Model Applied to Lunar Soil Remote Sensing	Wang Zhenzhan et al. (200)
Microwave Transfer Models and Brightness Temperature Simulations of MWS for Remote Sensing Lunar Surface on CE-1 Satellite	Wang Zhenzhan et al. (204)
Study of Mechanics of Remote Sensing and Exploring Method in Layered Medium	Lan Ailan et al. (208)

第四部分 全月表相关信息验证与反演

CE-1 Data Validation and Inversion

用“嫦娥一号”卫星微波探测仪亮温反演月壤厚度和 ³ He资源量评估的方法及初步结果分析	王振占 等(213)
月壤 ³ He资源估算及相关参量分析	李涤徽 等(229)
利用微波辐射计对月壤厚度进行研究	蓝爱兰 张升伟(241)
A Primary Analysis of Microwave Brightness Temperature of Lunar Surface and Chang'E-1 Multi-Channel Radiometer Observation and Inversion of Regolith Layer Thickness	Fa Wenzhe Jin Yaqiu(246)
Lunar Regolith Depth Retrieval Method for MWS on CE-1 Satellite	Wang Zhenzhan et al. (257)
Experimental Research and Statistical Analysis on the Dielectric Properties of Lunar Soil Simulators	Li Dihui et al. (263)
Microwave Brightness Temperature Imaging and Dielectric Properties of Lunar Soil	Wu Ji et al. (272)

第五部分 月球若干特征区微波特征分析

Microwave Radiation Analysis for Some Regions on the Moon

月球若干地区微波辐射特征研究	雷利卿 姜景山 等(281)
月球南极的微波辐射分布与异常	张卫国 等(293)
Distribution and Anomaly of Microwave Emission at Lunar South Pole	Zhang Weiguo et al. (303)

第六部分 月轨基雷达月表探测及成像模拟

Lunar Surface Sounding by Lunar Orbit-Based Radar

Numerical Simulation of Polarimetric Radar Pulse Echoes from Lunar Regolith Layer with Scatter Inhomogeneity and Rough Interfaces	Jin Yaqiu et al. (315)
SAR Imaging Simulation for an Inhomogeneous Undulated Lunar Surface Based on Triangulated Irregular Network	Fa Wenzhe et al. (325)
Simulation of Radar Sounder Echo from Lunar Surface and Subsurface Structure	Fa Wenzhe Jin Yaqiu(341)
Design and Simulation of VHF Surface Penetrating Imaging Radar	Zhang Yunhua et al. (354)
Design of the Surface Penetrating Radar for Lunar Rover	Dong Xiaolong et al. (362)

第一部分

微波月亮——人类对月球的全新视角

Microwave Moon——A New View of the Moon

中国首次月球探测工程科学探测系统及信息的初步分析^{*}

姜景山^{**} 孙辉先^{***}

1 概 述

2007年10月24日在西昌卫星发射场成功发射了我国首颗月球探测卫星“嫦娥一号”(CE-1)。卫星零窗口发射,准确入轨,精确测轨,经多次变轨十几天飞行,于11月5日成功进入绕月轨道,11月7日按计划准确进入离月面200km的绕月工作轨道,我国首次探月卫星首发成功。经调姿及各项仪器的相关调整,完成了科学探测的各项准备,于11月20日开始逐步开启探测仪器,开始了对月球的各项探测,发回了第一幅月表图像信息,经处理制成了中国第一幅月表图像。11月26日温家宝总理出席了我国首次月球探测工程获取的第一幅月面图首发式,并为第一幅图揭幕,宣布我国首次月球探测工程圆满成功。12月12日,由五部委在人民大会堂召开了“我国首次月球探测工程圆满成功庆功大会”,胡锦涛等中央领导出席会议。胡主席发表了重要讲话,指出:“我国首次月球探测工程的成功实施,进一步显示和提高了我国的经济势力、科技实力和民族凝聚力,极大地激发了全体中华儿女的爱国热情,进一步增强了全党全国各族人民全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的信心和决心”。首次探月成功是中国航天活动又一个新的里程碑,中国正式跨入世界上为数不多的、具有深空探测能力的国家行列。

“嫦娥奔月”的美好传说,传唱着我们的祖先对浩瀚的太空、美丽“月宫”的无限向往和揭开月球神秘面纱的崇高愿望和梦想。但在20世纪50年代人类真正进入太空以前,它只能是梦想。人类在20世纪所取得的最伟大的成就之一是进入了太空,开辟了

“太空时代”。自1957年苏联成功发射第一颗人造地球卫星“斯布特尼克”号(图1),1961年又是苏联航天员尤里·加加林(图2)成功完成地球轨道飞行后,各国竞相将目光关注到地球唯一的自然卫星——月球上,从而当时有技术和经济能力的国家便推出了一系列探月计划,并在20世纪60、70年代达到了一个高潮。苏联从1959年到1976年间先后发射了100多个与探月相关的飞行器,开展了对月球全面探测与研究,推动了空间探测及相关的基础与技术研究。

值得一提的是,20世纪六七十年代美国制定了庞大的“阿波罗”(Apollo)计划,先后进行了多次月球探测试验。1969年美国航天员乘“阿波罗-11号”降落到月球表面,开创了人类踏上月球的先河(图3)。

在此期间,美国和苏联共取回月球样品共382千克,其中美国先后取回样品300多千克。进入20世纪80年代后,再到20世纪90年代,各国月球探测几乎处于停止状态,这是所谓探月的宁静期。

1989年在“纪念人类第一次踏上月面20周年紀念大会”上,时任美国总统的老布什(George Herbert Walker Bush)先生提出“重返月球”的设想后,国际上相关国家都相继制订了本国的探月计划。“探测月球”又一次在新的、更高的起点上成了国际空间探测的热点。

在这一时期,几个具有代表意义的探月计划包括1994年美国发射的“克莱门汀号”(Clementine)(图4)。这一计划中进行了对月亮精确摄影测量,获取了月球数字地图和地形图,首次用紫外和远红外相机获取了月表11个波段的影像,制成了有关月表元素分布的专题图;经分析后声称在月球南极永久阴影区还可能存在水冰。1998年美国又发射了“月球勘探者号”(Lunar Prospector)(图5)。该卫

^{*} 原载于:中国科学技术前沿(中国工程院版),2008,(11):41-99.

^{**} 首次月球探测工程副总设计师、中国科学院探月应用总体部总设计师.

^{***} 首次月球探测工程卫星系统副总设计师、有效载荷系统总设计师.

星计划执行者声称其“探测结果支持了克莱门汀在月球南极发现水冰”的结论,而且还发现在月球北极的永久阴影区也可能存在水冰。除此之外,欧洲空间局于 2003 年发射了 SMART-1 探测器(图 6)。它是一个用太阳能离子推进器进行绕月的卫星。它对月球进行了探测,于 2004 年 4 月成功撞击月球,获取了宝贵资料。

2004 年 1 月时任美国总统乔治·布什(George W. Bush)先生宣布了新的美国太空探测战略设想,

提出一系列在新的高度上重返月球的政策和措施。根据这一设想,美国宇航局(NASA)对美国的空间探测计划 and 政策作了多方调整。随后,国际上一些国家也相继出台了新的空间探测计划,其中月球探测受到很大重视;但从这几年的发展情况看,不难发现这些调整进行得并不顺利。因此,中国的空间探测仍需以我为主,走自己的路。我们已制订的探月“三步走”的计划,证明是正确的、可行的。



图 1 “斯布特尼克”号



图 2 苏联宇航员尤里·加加林

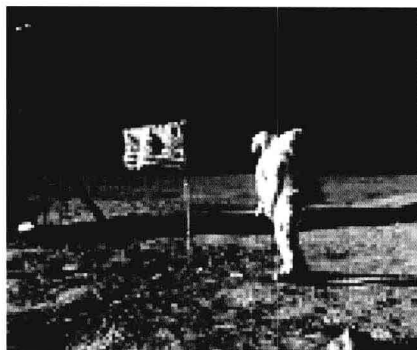


图 3 阿波罗 11 号(Apollo-11)

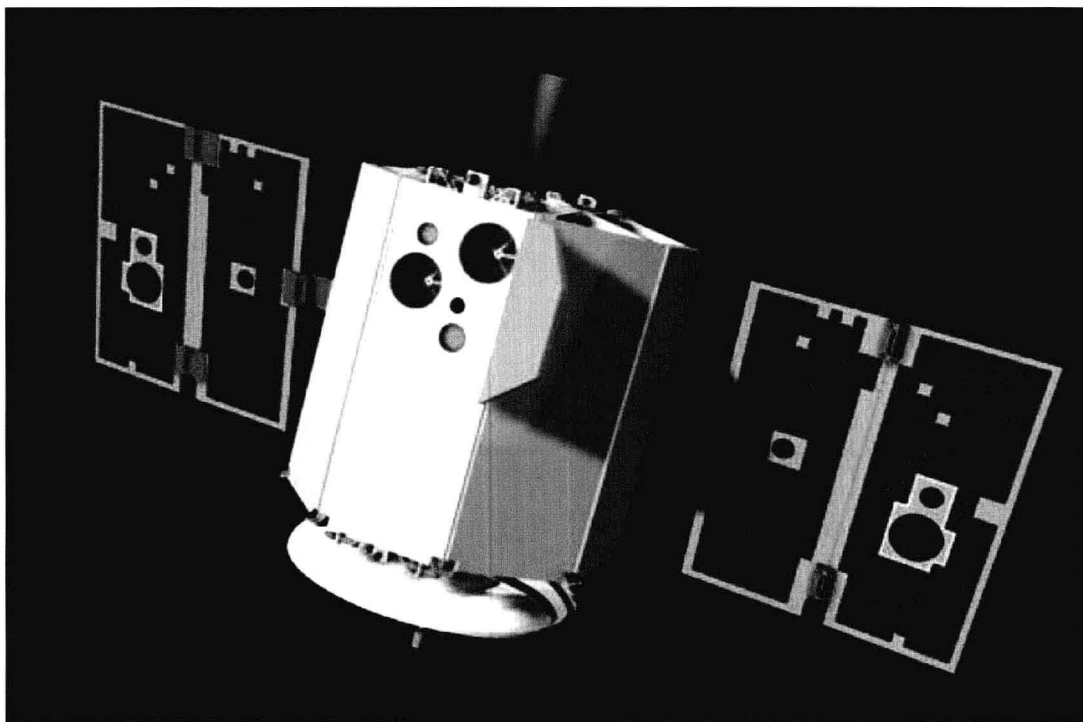


图4 克莱门汀号(Clementine Satellite)

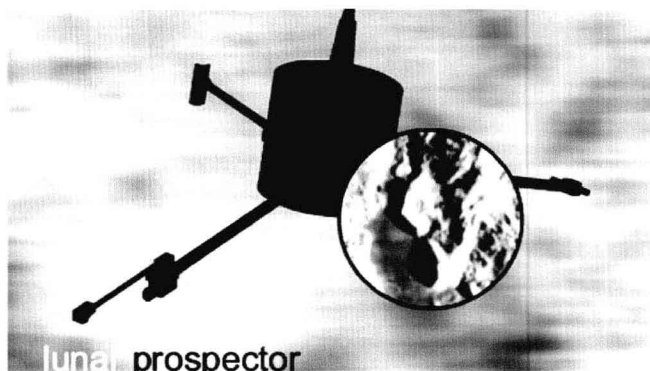


图5 月球勘探者号(Lunar Prospector)



图6 SMART-1 探测器

2 中国首次月球探测工程的实施

月球是离地球最近的天体,也是地球唯一的天然卫星。由于千年传承下来的“嫦娥奔月”故事和无数文人墨客的吟月诗篇,使人们无限向往月球。自古以来多少有志之士将揭开月球神秘面纱为己任,不断追求与探索,而只有到20世纪人类进入太空、开辟太空时代才有可能实现这几千年的追求之梦。自从20世纪六七十年代出现的月球探测的高

潮及随后的冷静期和重返月球热再掀起的几十年过程,中国科技人员作为“嫦娥故乡”的人,始终以极大的热情关注着探月活动的发展,并从不同角度开展了月球探测的准备工作,等待时机成熟。到20世纪90年代,我国航天事业取得了令人瞩目的成果,应用卫星与卫星应用始终是发展航天的重点,并获得了长足发展,航天成果已在我国国民经济、国防建设及科学研究等方面发挥了重要作用。自20世纪90年代初进行的载人航天工程取得了突破性进展,2004年我国第一位航天员杨立伟成了

第一位在轨飞行的航天员,开创了中国航天的第二个里程碑。近几年,我国综合国力和科技势力不断发展,为实现月球探测工程奠定了坚实基础。由于有了这些因素,自20世纪90年代初,中国已把月球探测提到日程上来。2000年的《中国航天白皮书》明确提出了我国开展以月球探测为主的深空探测发展目标。

20世纪90年代初,时任国家科委主任的宋健院士提出研究我们能否启动探月计划,能否在几年内发射探月卫星。早已有准备的相关科技人员和单位积极响应,中国科学院空间中心、贵阳地球化学研究所等单位立即组织研究小组,提出了科学目标、载荷配置及对卫星、火箭的技术要求,航科集团一院、五院提出了探测卫星、运载火箭的可行性方案;在国家科委的组织协调下,提出了初步方案。但由于一些技术问题和经费问题,此研究未能按预期实现。但此次研究已明确了关键问题和需进一步解决的一些问题。20世纪90年代,863航天领域应用专家组在发展战略中提出方向性课题,研究月球探测科学问题和有效载荷配置问题,得到总装备部机关和时任863航天领域首席科学家闵桂荣院士的大力支持。从1997年至2000年两次拨款中国科学院贵阳地球化学研究所等单位开展研究。这是首次由国家相关计划出资支持探月的项目,为启动我国探月工程打下基础。

在这几年研究基础上,从2001年起,国防科工委组织科技人员研究月球探测的技术方案和一期任务的科学目标。经过两年多的努力,深入论证了科学目标及其实施途径,工程技术方案及全系统经济、技术可行性方案等,形成了首次探月工程的基本工程总体思路。在此期间,《国家科技发展中长期规划》中提出了实施月球探测二、三期规划问题,也推动了一期的立项和工程实施。2003年9月,国防科工委向中央汇报了“我国月球探测工程总体思路”,提出我国探月工程将遵循“循序渐进、分步实施、不断跨越”的原则,分“绕、落、回”三个发展阶段实施,而第一步“绕”在中长期规划外单独立项。2004年1月13日国防科工委、财政部联合向国务院上报了“国防科工委、财政部关于绕月探测工程立项请示”(科工技[2004]72号)。2004年1月23日,国务院正式批准绕月探测工程立项。

自批准立项起,根据工程需要组织五大系统分别研制。经过初样、正样研制,2007年初已达到了

实施发射的条件。

2007年10月24日,“嫦娥一号”卫星由“长征三号甲”运载火箭在西昌卫星发射场发射成功。11月5日成功进入绕月轨道,11月7日建立了对月探测轨道,各项仪器顺序打开工作,11月26日第一幅月面图像正式对外公布,实现了“准时发射、准确入轨、精密测控、精确变轨、成功绕月、获取成果”,首次月球探测工程圆满成功。“嫦娥一号”卫星目前仍在正常工作,传回各种信息。目前正在加紧进行地面处理和科学分析,以取得更丰富的科学成果。

3 科学探测及其技术

3.1 “嫦娥一号”卫星的科学任务

在深入分析、研究国际月球探测的发展和已取得的成果基础上,有关专家结合我国月球探测的发展规划和技术基础,经过充分的论证,确定了“嫦娥一号”卫星的科学和应用目标。“嫦娥一号”卫星的科学和应用目标既具有突出的创新性,又充分考虑了技术可行性,将为我国月球探测的长远发展打下良好基础,同时将带动我国航天技术的跨越式发展。“嫦娥一号”卫星科学目标如下。

3.1.1 获取月球表面三维影像

通过获取月球表面三维立体影像,划分月球表面的基本构造和地貌单元;进行月球表面撞击坑形态、大小、分布、密度等的研究;划分月球断裂和环形影像纲要图,勾画月球地质构造演化史。同时,根据月球表面三维立体影像,为月球探测的后续计划提供合适的软着陆和勘测区域范围的参考信息。

3.1.2 分析月球表面有用元素含量和物质类型的分布特点

月球的岩石类型及有关元素的分布,是月球资源调查和开发的基础数据,也是月球科学研究的主要信息来源。“嫦娥一号”卫星通过为期一年的环月轨道飞行,将对月球表面有开发利用和研究价值的14种元素(K、Th、U、O、Si、Mg、Al、Ca、Fe、Ti、Na、Mn、Cr、Gd等)的含量与分布进行探测。本项科学与应用目标将绘制各元素的全月球分布图;发现月表资源富集区和鉴别新的岩石类型,为月球的开发利用提供有关资源分布的数据以及对月球地质历史和热历史进行深入研究。